

ПАРАМЕТРИ ЧИСТОТИ КОЛОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

Пільтяй Степан Іванович, к.т.н., доцент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Вступ

Анени з коловою поляризацією широко застосовуються в супутникових телекомунікаційних системах, телевізійних системах, системах мобільного зв'язку, системах радіочастотної ідентифікації, бездротових мережах передачі даних, супутникових системах навігації, радіолокаційних системах. Широке використання антен із коловою поляризацією пояснюється притаманними їй перевагами порівняно з іншими видами поляризації.

Поляризація електромагнітної хвилі (ЕМХ) впливає на процес її поширення у просторі [1, 2]. Застосування колової поляризації дозволяє зменшити вплив завмирань сигналу та його деструктивної інтерференції внаслідок багатопроменевого поширення. Відбитий від поверхні землі або від інших об'єктів сигнал змінює свою колову поляризацію на ортогональну (наприклад, праву колову поляризацію на ліву). Приймальна антена, яка налаштована для прийому основної поляризації (наприклад, правої колової) буде відбивати сигнал ортогональної колової поляризації (лівої колової), який є відбитим від поверхні землі або певного об'єкта. Таким чином, вплив відбитих непарну кількість разів сигналів, які надходять до приймальної антени, буде нехтовно малим. Відповідно, використання колової поляризації покращує характеристики радіотехнічних систем, що функціонують в умовах багатопроменевого поширення електромагнітних хвиль.

Іншою перевагою використання колової поляризації є її стійкість до впливу повороту площини поляризації лінійно поляризованих хвиль внаслідок ефекту Фарадея в іоносфері [1–3], або при проходженні ділянок атмосфери з великою кількістю води, особливо під час дощу [4]. Ефект Фарадея може спричиняти значні втрати сигналу, якщо він передається за допомогою ЕМХ із лінійною поляризацією. У іоносфері ЕМХ із цим типом поляризації зазнають випадкових поворотів площини поляризації, спричинених зміною умов у іоносфері. Кут повороту залежить від товщини та температури іоносфери, а також від частоти ЕМХ [3]. Він є більшим для нижчих частот. Унаслідок цього приймальна антена радіотехнічної системи повинна відслідковувати кут нахилу площини поляризації вхідної ЕМХ. Оскільки при поширенні через іоносферу ЕМХ із коловою поляризацією повороту зазнає кожна з двох ортогональних лінійно поляризованих складових, то загалом після проходження іоносфери колова поляризація зберігається. Через це колову поляризацію широко використовують у тих радіотехнічних системах, де ЕМХ, які передають сигнал, повинні поширюватись через іоносферу, напри-

клад, у супутниковій телеметрії, для зв'язку з космічними зондами та балістичними ракетами.

Використання антен із коловою поляризацією підвищує ефективність радіолокаційних систем [4]. Достатньо складно створити поглинаючі матеріали, які б не відбивали ЕМХ із коловою поляризацією. Відомо, що для радара із антеною, яка працює на лінійній поляризації, лінійні або близькі до них цілі при повороті у поперечній площині створюють синусоїдальну від кутового залежності прийнятого сигналу. В околах нулів цієї залежності радар не виявлятиме цілей. Цього недоліку позбавлені радары із коловою поляризацією, оскільки обертання вектора напруженості електричного поля у просторі дозволяє фіксувати лінійні цілі незалежно від їх орієнтації. До того ж, радары із коловою поляризацією є ефективнішими при радіолокації цілей в умовах дощу, оскільки завади, що створюються внаслідок відбиття ЕМХ із коловою поляризацією від крапель води, є меншими, ніж ті що виникають при відбитті ЕМХ лінійної поляризації [4].

Ще однією перевагою застосування колової поляризації є відсутність необхідності чіткої орієнтації за кутом між передавальною та приймальною антенами для встановлення зв'язку [1–5]. Це відрізняє колову поляризацію від лінійної, при використанні якої з'являються втрати сигналу внаслідок неузгодження орієнтації площин поляризації передавальної та приймальної антен. Ця перевага колової поляризації є важливою для мобільних супутникових телекомунікаційних систем, у яких складно забезпечити фіксовану орієнтацію однієї антени відносно іншої, та для зв'язку зі супутниками, що обертаються навколо напрямку радіолінії. При застосуванні колової поляризації рівень прийнятого сигналу є постійним, незалежно від орієнтації антени. Усі зазначені вище переваги пояснюють, чому антени із коловою поляризацією широко застосовуються в радіотехнічних системах різноманітного призначення.

Чистоту колової поляризації характеризують кількома параметрами: диференціальним фазовим зсувом між ортогональними лінійно поляризованими складовими, що формують ЕМХ колової поляризації, коефіцієнтом еліптичності та кросполяризаційною розв'язкою. У представленій роботі отримано формули зв'язку вказаних параметрів між собою та наведено таблиці, в яких за одним із параметрів можна визначити інші.

Складові колових поляризацій у ортогональному лінійному базисі та диференціальний фазовий зсув між ними

ЕМХ чистої колової поляризації можна представити за допомогою суми ортогональних у просторі ЕМХ із лінійними поляризаціями, амплітуди яких точно рівні між собою, а диференціальний фазовий зсув між ними становить 90° . Внаслідок цього перпендикулярні у просторі складові є ортогональними у часі.

Для хвилі правої колової поляризації, яка поширюється вздовж осі z , складова електричного поля вздовж осі y відстає за фазою від складової,

спрямованої по осі x на 90° [1, 6]. Комплексна амплітуда ЕМХ правої колової поляризації може бути записана таким чином [1, 6]:

$$\dot{E}_R = \dot{E}_0(\vec{e}_x + e^{-i90^\circ} \cdot \vec{e}_y) = \dot{E}_0(\vec{e}_x - i \cdot \vec{e}_y), \quad (1)$$

де \dot{E}_0 — амплітуда електричного поля, яка враховує його початкову фазу, i — уявна одиниця, \vec{e}_x , \vec{e}_y — орти декартової системи координат.

Для хвилі лівої колової поляризації, яка поширюється вздовж осі z , складова електричного поля, що спрямована вздовж осі y , випереджає за фазою складову по осі x на 90° [1, 6]. Комплексна амплітуда ЕМХ лівої колової поляризації може бути представлена у такій формі [1, 6]:

$$\dot{E}_L = \dot{E}_0(\vec{e}_x + e^{i90^\circ} \cdot \vec{e}_y) = \dot{E}_0(\vec{e}_x + i \cdot \vec{e}_y). \quad (2)$$

Із метою формування ЕМХ колових поляризацій використовують поляризатори [4, 7]. Вони вносять близький до 90° диференціальний фазовий зсув між ЕМХ ортогональних лінійних поляризацій, які проходять через поляризатор, і передають їх на спільний вихідний хвильовід, практично не порушуючи рівність амплітуд перпендикулярних складових. Нехай δ° позначає максимальне відхилення фазового зсуву від 90° . При цьому $\delta^\circ \ll 90^\circ$. Фазовий зсув між ортогональними складовими можна записати як $\Delta\phi = 90^\circ \pm \delta^\circ$. Тоді комплексну амплітуду ЕМХ із близькою до колової поляризацією запишемо наступним чином:

$$\dot{E} = \dot{E}_0(\vec{e}_x + e^{\mp i\Delta\phi} \cdot \vec{e}_y) = \dot{E}_0(\vec{e}_x \mp i \cdot e^{\pm i\delta^\circ} \cdot \vec{e}_y). \quad (3)$$

Порівнявши (3) із (1) і (2), бачимо, що у формулі (3) знак “—” між доданками відповідає поляризації, близькій до правої колової, а знак “+” — поляризації, близькій до лівої колової. Для кожної з них у показнику експоненти може бути як “+”, так і “—”.

Коефіцієнт еліптичності та кросполяризаційна розв’язка

Якщо поляризація ЕМХ є близькою до колової, то у площині, перпендикулярній напрямку поширення хвилі, зі зміною часу кінець вектора напруженості електричного поля буде описувати еліпс, який незначно відрізняється від кола. Для характеристики форми цього еліпса використовують коефіцієнт еліптичності. За визначенням коефіцієнт еліптичності — це відношення великої осі поляризаційного еліпса a до його малої осі b [1–5]: $AR = a/b$. Очевидно, що для ЕМХ чистої колової поляризації коефіцієнт еліптичності дорівнює одиниці. Часто коефіцієнт еліптичності виражають у децибелах:

$$AR = 20 \log_{10} a / b. \quad (4)$$

Коефіцієнт еліптичності ЕМХ чистої колової поляризації дорівнює 0 дБ.

Визначимо коефіцієнт еліптичності для ЕМХ, комплексна амплітуда якої задана формулою (3).

$$\begin{aligned} \dot{\vec{E}} &= \dot{E}_0(\vec{e}_x \mp i \cdot e^{\pm i\delta^\circ} \cdot \vec{e}_y) = \dot{E}_0 e^{\pm i\delta^\circ/2} (e^{\mp i\delta^\circ/2} \vec{e}_x \mp i \cdot e^{\pm i\delta^\circ/2} \cdot \vec{e}_y) = \dot{E}_0 e^{\pm i\delta^\circ/2} \times \\ &\times \left[\left(\cos \frac{\delta^\circ}{2} \mp i \sin \frac{\delta^\circ}{2} \right) \vec{e}_x \mp i \cdot \left(\cos \frac{\delta^\circ}{2} \pm i \sin \frac{\delta^\circ}{2} \right) \vec{e}_y \right] = \dot{E}_0 e^{\pm i\delta^\circ/2} \left[\cos \frac{\delta^\circ}{2} (\vec{e}_x \mp i \cdot \vec{e}_y) \mp \right. \\ &\left. \mp i \cdot \sin \frac{\delta^\circ}{2} (\vec{e}_x \pm i \cdot \vec{e}_y) \right] = \dot{E}_0 \cos \frac{\delta^\circ}{2} e^{\pm i\delta^\circ/2} \left[(\vec{e}_x \mp i \cdot \vec{e}_y) \mp i \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta^\circ}{2} (\vec{e}_x \pm i \cdot \vec{e}_y) \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

У формулі (5) із ЕМХ, в якій перпендикулярні лінійно поляризовані складові мають фазовий зсув $\Delta\varphi = 90^\circ \pm \delta^\circ$, у явній формі виділено складові ортогональних чистих колових поляризацій. Як бачимо, при $\delta^\circ = 0$ результуюча ЕМХ буде мати чисту колову поляризацію. В іншому випадку отримаємо еліптичну поляризацію, при якій в одні моменти часу складові електричного поля із ортогональними коловими поляризаціями додаються, а в інші — віднімаються. Тому із (4), (5) коефіцієнт еліптичності в децибелах можна виразити таким чином:

$$AR = 20 \log_{10} \frac{1 + \operatorname{tg}(\delta^\circ/2)}{1 - \operatorname{tg}(\delta^\circ/2)} \quad (6)$$

Кросполяризаційна розв'язка — це відношення амплітуди електричного поля необхідної поляризації до амплітуди електричного поля небажаної поляризації [4]. Із формули (5) видно, що для ЕМХ, в якій перпендикулярні лінійно поляризовані складові мають фазовий зсув $\Delta\varphi = 90^\circ \pm \delta^\circ$, це відношення дорівнює $\operatorname{tg}(\delta^\circ/2)$. Тоді кросполяризаційна розв'язка в децибелах:

$$XPD = -20 \log_{10} \operatorname{tg}(\delta^\circ/2) \quad (7)$$

Зв'язок параметрів чистоти колової поляризації

Отримані вище формули (6), (7) пов'язують між собою диференційний фазовий зсув $\Delta\varphi = 90^\circ \pm \delta^\circ$, коефіцієнт еліптичності та кросполяризаційну розв'язку. На основі формул (6), (7) проведено розрахунки вказаних величин і їх результати представлено у таблиці.

Параметри чистоти колової поляризації

$\Delta\varphi$	AR , дБ	XPD , дБ	$\Delta\varphi$	AR , дБ	XPD , дБ
90°	0	∞	$90^\circ \pm 3^\circ 40'$	0,556	29,9
$90^\circ \pm 0^\circ 20'$	0,051	50,7	$90^\circ \pm 4^\circ 00'$	0,607	29,1
$90^\circ \pm 0^\circ 40'$	0,101	44,7	$90^\circ \pm 4^\circ 20'$	0,658	28,4
$90^\circ \pm 1^\circ 00'$	0,152	41,2	$90^\circ \pm 4^\circ 40'$	0,708	27,8
$90^\circ \pm 1^\circ 20'$	0,202	38,7	$90^\circ \pm 5^\circ 00'$	0,759	27,2
$90^\circ \pm 1^\circ 40'$	0,253	36,7	$90^\circ \pm 5^\circ 20'$	0,810	26,6
$90^\circ \pm 2^\circ 00'$	0,303	35,2	$90^\circ \pm 5^\circ 40'$	0,860	26,1
$90^\circ \pm 2^\circ 20'$	0,354	33,8	$90^\circ \pm 6^\circ 00'$	0,911	25,6
$90^\circ \pm 2^\circ 40'$	0,404	32,7	$90^\circ \pm 6^\circ 20'$	0,962	25,1
$90^\circ \pm 3^\circ 00'$	0,455	31,6	$90^\circ \pm 6^\circ 40'$	1,013	24,7
$90^\circ \pm 3^\circ 20'$	0,506	30,7	$90^\circ \pm 7^\circ 00'$	1,064	24,3

Висновки

У роботі знайдено формули зв'язку диференційного фазового зсуву між ортогональними лінійно поляризованими складовими, що формують ЕМХ колової поляризації, із коефіцієнтом еліптичності та кросполяризаційною розв'язкою. Проведено розрахунки цих параметрів. Отримані результати можуть бути використані для визначення коефіцієнта еліптичності та кросполяризаційної розв'язки за диференційним фазовим зсувом, який вносить поляризатор, або для знаходження коефіцієнта еліптичності поля випромінювання антени за кросполяризаційною розв'язкою чи навпаки.

Перелік посилань

1. Stutzman W. L. Antenna Theory and Design / W. L. Stutzman, G. A. Thiele. — Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. — 820 p.
2. Gao S. Circularly Polarized Antennas / S. Gao, Q. Luo, F. Zhu. — Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2014. — 307 p.
3. Huang Y. Antennas: From Theory to Practice / Y. Huang, K. Boyle. — Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2008. — 363 p.
4. Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, 6 Volume Set / K. Chang, editor-in-chief. — Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. — 5796 p.
5. Kinayman N. Modern Microwave Circuits / N. Kinayman, M. I. Aksun. — Norwood, United States of America: Artech House, 2005. — 604 p.
6. Pozar D. M. Microwave Engineering / D. M. Pozar. — Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. — 732 p.
7. Rao S. Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems Volume III: Applications of Reflectors / S. Rao, L. Shafai, S. Sharma. — Boston, USA: Artech House, 2013. — 447 p.

Анотація

Знайдено формули зв'язку диференційного фазового зсуву між ортогональними лінійно поляризованими складовими, що формують електромагнітну хвилю колової поляризації, із коефіцієнтом еліптичності та кросполяризаційною розв'язкою. Проведено розрахунки цих параметрів чистоти колової поляризації.

Ключові слова: колова поляризація, диференційний фазовий зсув, коефіцієнт еліптичності, кросполяризаційна розв'язка.

Аннотация

Найдены формулы связи дифференциального фазового сдвига между ортогональными линейно поляризованными составляющими, которые формируют электромагнитную волну круговой поляризации, с коэффициентом эллиптичности и кроссполяризационной развязкой. Проведено расчеты этих параметров чистоты круговой поляризации.

Ключевые слова: круговая поляризация, дифференциальный фазовый сдвиг, коэффициент эллиптичности, кроссполяризационная развязка.

Abstract

The formulas of connection of the differential phase shift between orthogonal linearly polarized components, which form electromagnetic wave with circular polarization, with the axial ratio and with the cross-polarization discrimination have been obtained. The calculations of the parameters of circular polarization purity have been performed.

Keywords: circular polarization, differential phase shift, axial ratio, cross-polarization discrimination.